

Научная статья

УДК 550.311

DOI: 10.37102/0869-7698_2023_228_02_3

EDN: CAJINQ

О геотермодинамическом механизме формирования залежей углеводородов в зоне кайнозойской субдукции Амурской литосферной плиты

С.В. Гаврилов, А.Л. Харитонов✉

Сергей Владиленович Гаврилов

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Российская Федерация

gavrilov@ifz.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2737-2632>

Андрей Леонидович Харитонов

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Российская Федерация

ahariton@izmiran.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>

Аннотация. Цель статьи – сконцентрировать основное внимание на геотермодинамическом механизме формирования залежей углеводородов, сформировавшихся в зонах кайнозойской литосферной субдукции Амурской плиты, а также на тектономагматическом механизме их миграции в верхние структурные этажи складчатой системы. В дальнейшем это приводит к выносу углеводородов гидротермальными растворами в складчатые образования островодужного типа и формированию гидротермальных месторождений нефти и газа. Методы исследования работают в предположении неньютоновской реологии мантии. В результате было выполнено численное моделирование 2D термической конвекции, возбуждаемой диссипативным тепловыделением в мантийном клине при субдукции Амурской литосферной плиты под Охотоморскую литосферную плиту, к востоку от острова Сахалин. В модели учитываются фазовые переходы в мантии на глубинах 410 и 660 км. Также было показано, что в рамках построенной модели локализация, широтная протяженность и величина теплового потока в вытянутой параллельно острову Сахалин зоне аномального мантийного теплового потока соответствуют скорости субдукции ~ 8–10 мм в год при наблюдаемом угле субдукции (~36°), происходящей в восточном направлении, и содержании воды в мантийном клине ~ 1 вес.%. При такой субдукционной скорости в мантийном клине возбуждается одна конвективная ячейка с единственным 2D конвективным течением, восходящим к зоне максимального мантийного теплового потока, составляющего ~130 мВт · м² и наблюдаемого в бассейне Охотского моря. В заключение можно сказать, что сравнение модельных масштабов и расположения

конвективных потоков в мантийном клине для случаев континентального и океанического типов Охотоморской литосферной плиты служит доказательством в пользу первого (континентального) типа Охотоморской литосферной плиты. При полученной скорости вещества порядка десятков миллиметров в год в конвективных вихрях в мантийном клине у кровли мантии восходящий конвективный поток может обеспечить наблюдаемый вынос тепла и мантийных углеводородов к дневной поверхности.

Ключевые слова: угол, скорость субдукции, реология мантии, термическая конвекция, углеводороды

Для цитирования: Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. О геотермодинамическом механизме формирования залежей углеводородов в зоне кайнозойской субдукции Амурской литосферной плиты // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 2. С. 49–63. http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_228_02_3.

Original article

On the geothermodynamic mechanism of formation of hydrocarbon deposits in the Cenozoic subduction zone of the Amur Lithospheric Plate

S.V. Gavrilov, A.L. Kharitonov

Sergey V. Gavrilov

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Chief Researcher
Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russian Federation
gavrilov@ifz.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2737-2632>

Andrey L. Kharitonov

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, RAS, Moscow, Russian Federation
ahariton@izmiran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>

Abstract. The purpose of the paper is to focus on the geothermodynamic mechanism of formation of hydrocarbon deposits formed in the zones of Cenozoic lithospheric subduction of the Amur Plate, as well as on the tectonic-magmatic mechanism of their migration to the upper structural floors of the folded system. In the future, this leads to the removal of hydrocarbons by hydrothermal solutions into folded formations of the island-arc type and the formation of hydrothermal oil and gas deposits. The research methods work under the assumption of non-Newtonian mantle rheology. As a result, for the non-Newtonian mantle rheology case the 2D dissipation-driven thermal convection in the mantle wedge above the Amur Lithospheric Plate subducting under the Okhotsk Sea Lithospheric Plate to the east of the Sakhalin Island is modeled numerically. The effects of the 410 km and 660 km phase transitions are taken into account in the model. It was also shown that, within the framework of the constructed model, the localization, latitudinal extent and magnitude of the heat flow in the zone of anomalous mantle heat flow extended parallel to the Sakhalin Island correspond to the subduction velocity of ~ 8–10 mm per year at

the observed subduction angle ($\sim 36^\circ$) occurring in the east direction and the water content in the mantle wedge ~ 1 weight %. At such a subduction velocity, one convective cell with a single 2D convective flow ascending to the zone of the maximum mantle heat flux of $\sim 130 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ and observed in the Okhotsk Sea basin is excited in the mantle wedge. In conclusion, it may be said that the comparison of the model scales and locations of convective flows in the mantle wedge for the cases of continental and oceanic types of the Okhotsk Sea Lithospheric Plate serves as the evidence in favor of the former (continental) type of Okhotsk Sea Lithospheric Plate. Upwelling mantle wedge convective flow is indicated to be able to provide the mantle wedge hydrocarbons transport to the daylight surface.

Keywords: angle, subduction velocity, mantle rheology, thermal convection, hydrocarbons

For citation: Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. On the geothermodynamic mechanism of formation of hydrocarbon deposits in the Cenozoic subduction zone of the Amur Lithospheric Plate. *Vestnik of the FEB RAS.* 2023;(2):49-63. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_228_02_3.

Введение

В число тектонических плит на Дальнем Востоке Российской Федерации (рис. 1) помимо трех основных – Евразийской, Тихоокеанской и Северо-Американской входят и литосферные плиты меньших размеров: Амурская, Охотоморская (концепция Амурской была впервые обоснована в [1]).

Месторасположение и характер границы между Амурской и Охотоморской литосферными плитами в последнее время стали предметом неоднозначных, а иногда и противоречивых дискуссий [2]. Согласно этой публикации, а также



Рис. 1. Конвергентные границы литосферных плит Земли (Евразийской, Северо-Американской, Тихоокеанской, Амурской, Охотоморской), проходящие в районе исследований [1]. 1 – границы раздвижения литосферных плит, 2 – границы сближения литосферных плит, 3 – границы столкновения континентов, 4 – границы скольжения литосферных плит относительно друг друга, 5 – сдвиги и тектонические разломы, 6 – зоны сейсмичности

[3], остров Сахалин относится к активному региону Северо-Восточной Азии и является территорией, образующей границу между крупнейшими литосферными плитами Земли, а именно Евразийский, Северо-Американский и Тихоокеанский. Вдоль сходящихся границ этих плит пролегает широкая пограничная зона, представленная Амурской, Охотоморской, Курильской литосферными плитами, две крупнейшие из которых (Амурская и Охотоморская) разделены большим Центрально-Сахалинским (Тымско-Поронайским) разломом. Аргументы в [4, 5] поддерживают идею о субдукции Амурской плиты на восток под Охотоморскую со скоростью $V \sim 10$ мм в год. В [6] данные GPS-наблюдений, собранные на Дальнем Востоке за более чем 10-летний период, также указывают на субдукцию Амурской литосферной плиты на восток под Охотоморскую литосферную плиту по разлому, разделяющему о-в Сахалин пополам. Согласно сейсмическим данным угол субдукции равен 36° . Стоит отметить, что в [7] сообщается, что граница между Амурской и Охотоморской литосферными плитами является границей неоднозначной природы, в то время как в [8] считается, что граница между Амурской и Охотоморской литосферными плитами делит пополам о-в Сахалин, где происходят многочисленные мелкие микроземлетрясения. Преобладающими геологическими структурами там являются те, которые соответствуют тектонике сжатия, такие как разломы и складки ориентации север – юг, направленные вдоль продольной оси о-ва Сахалин. Одним из основных разломов является надвиговой Центрально-Сахалинский меридиональной ориентации, опускающийся на запад под углом примерно $45\text{--}70^\circ$.

Целью настоящего исследования является моделирование конвективного массо- и диссипативного переноса тепла из мантийного клина над субдукцирующей Амурской литосферной плитой к поверхности Земли. Моделирование локализации и поперечной горизонтальной протяженности 2D зоны аномального теплового потока на Охотском морском дне к востоку от о-ва Сахалин (а также максимального абсолютного значения теплового потока) позволяет получить надежные доказательства в поддержку амплитуды и восточного направления субдукции Амурской литосферной плиты. Построенная здесь модель косвенно подтверждает преобладание неньютоновской реологии мантии в мантийном клине, достаточно насыщенном водой, извлеченной из субдуцирующей литосферной плиты, все более сжимающейся в ходе субдукции.

Согласно [9–11], возможны два типа мелкомасштабной термической конвекции, обусловленной диссипацией, в мантийном клине, а именно: 3D пальцевидные конвективные струи, поднимающиеся к вулканической цепи, и 2D поперечные вихри Карига [12], ориентированные перпендикулярно направлению зоны субдукции. Показано, что эти два типа конвекции пространственно разделены из-за зависимости эффективной вязкости мантии от давления и температуры, а конвективные вихри Карига, если таковые образовались, расположены за вулканической дугой [9]. Поскольку отсутствует однозначное понимание о направлении субдукции литосферных плит в районе о-ва Сахалин, нынешнее моделирование распределения и абсолютной величины аномального теплового потока [13] на поверхности морского дна Охотского моря тем более важно, поскольку оно может послужить решающим аргументом в пользу кайнозойской субдукции Амурской литосферной плиты на восток.

Численное моделирование 2D мантийной конвекции, происходящей в форме конвективных вихрей Карига, переносящих диссипативное тепло, может

позволить судить о среднем содержании воды в мантийном клине, а также о конвективном переносе мантийных простейших углеводородов (алкены, алканы, алкины) к поверхности дна Охотского моря. Представленная здесь модель конвекции учитывает зависимость вязкости от температуры и давления и наилучшим образом соответствует наблюдениям в случае неньютоновской реологии при среднем содержании воды ~1 вес.% и скорости субдукции ~8–10 мм в год. В [13] указано, что такое большое (и даже в несколько раз большее) содержание воды возможно наблюдать в переходной зоне мантийного клина.

Метод исследования

В качестве модели термомеханического состояния мантийного клина между подошвой Охотоморской литосферной плиты и поверхностью Амурской, поддвигающейся под Охотоморскую под углом β со скоростью V , примем модель, получаемую при $Pr \rightarrow \infty$ в приближении Буссинеска из системы двумерных безразмерных уравнений гидродинамики для функции тока ψ и температуры T [14]:

$$\begin{aligned} (\partial_{zz}^2 - \partial_{xx}^2) \cdot \eta \cdot (\partial_{zz}^2 - \partial_{xx}^2) \cdot \psi + 4 \cdot \partial_{xz}^2 \eta \cdot \partial_{xz}^2 \psi = \\ = Ra \cdot T_x - Ra^{(410)} \cdot \Gamma_x^{(410)} - Ra^{(660)} \cdot \Gamma_x^{(660)}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\partial_t T = \Delta T - (\psi_z \cdot T_x) + (\psi_x \cdot T_z) + Di/Ra \cdot \tau_{ik}^2 / (2 \cdot \eta) + Q, \quad (2)$$

здесь η – безразмерный коэффициент динамической вязкости, символ ∂ и индексы означают частные производные по координатам x (горизонтальной), z (вертикальной) и времени t , Δ – оператор Лапласа, $\Gamma_x^{(410)}$ и $\Gamma_x^{(660)}$ – объемные доли тяжелой фазы на фазовых переходах на глубинах 410 и 660 км, компоненты скорости V_x и V_z связаны с функцией тока как

$$V_x = \psi_z, \quad V_z = -\psi_x, \quad (3)$$

а безразмерные числа Рэлея Ra , фазовые $Ra^{(410)}$, $Ra^{(660)}$ и диссипативное Di есть:

$$\begin{aligned} Ra &= [(\alpha \cdot \rho \cdot g \cdot d^3 \cdot T_1) / (\eta_c \cdot \chi)] = 6,62 \cdot 10^8, \\ Ra^{(410)} &= [(\delta\rho^{(410)} \cdot g \cdot d^3) / (\eta_c \cdot \chi)] = 7,87 \cdot 10^8, \\ Ra^{(660)} &= [(\delta\rho^{(660)} \cdot g \cdot d^3) / (\eta_c \cdot \chi)] = 10,0 \cdot 10^8, \\ Di &= [(\alpha \cdot g \cdot d) / c_p] = 0,175, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha = 3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ – коэффициент теплового расширения, $\rho = 3,3 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность мантии, g – ускорение силы тяжести, $c_p = 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $T_1 = 1950 \text{ K}$ – температура у основания переходной зоны мантии (ПЗМ) на глубине 700 км, считающейся нижней границей модельной области, $Q = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-3}$ – объемная мощность тепловыделения в оре, τ_{ik} – тензор вязких напряжений, $d = 700 \text{ км}$ – вертикальный размер модельной области, $\eta_c = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – масштабный множитель вязкости, $\chi = 1 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – коэффициент температуропроводности, $\delta\rho^{(410)} = 0,07\rho$ и $\delta\rho^{(660)} = 0,09\rho$ – скачки плотности на фазовых переходах на глубинах 410 и 660 км. В (1), (2) масштабными множителями для времени t , напряжений τ_{ik} и функции тока ψ служат соответственно величины $(d^2 \cdot \chi^{-1})$, $(d^{-2} \cdot \eta_c \cdot \chi)$ и χ . В предположении линейной реологии для диффузионного механизма ползучести, доминирующего

в мантии на глубинах более ~200 км [15], зависимость коэффициента вязкости η от температуры T и литостатического давления p принималась в виде [13]:

$$\eta = (\mu / 2 \cdot A) \cdot (C_w^r \cdot \tau^{n-1}) \cdot (h/b^*)^m \cdot \{\exp[(E^* + p \cdot V^*)/(R \cdot T)]\}, \quad (5)$$

где для «влажного» оливина $A = 5,3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, $m = 2,5$, размер зерна $h = 10^{-1}-10^1 \text{ мм}$, вектор Бюргерса $b^* = 5 \cdot 10^{-7} \text{ мм}$ [13], энергия активации $E^* = 240 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, объем активации $V^* = 5 \cdot 10^3 \text{ мм}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$, нормирующее значение модуля сдвига $\mu = 300 \text{ ГПа}$, R – универсальная газовая постоянная. При этих значениях констант, выбранном масштабном множителе $\eta_c = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и размере зерна $h = 1,6 \text{ мм}$ безразмерный коэффициент вязкости, который также обозначается через η , равен:

$$\eta = (5,00 \cdot 10^{-7}) \cdot \exp\{[14,80 + 6,72 \cdot (1 - z)]/T\}, \quad (6)$$

где T – безразмерная температура, а безразмерная координата z , нормированная на d , отсчитывается вверх от основания ПЗМ (ось x направлена по нижней границе ПЗМ против субдукции). Чтобы проверить, насколько для получаемых оценок скорости субдукции Амурской литосферной плиты существенно предположение о линейной реологии мантии, в настоящей работе проведен расчет для неньютоновской реологии, для которой формулы вязкости (5), (6) переписываются в виде:

$$\eta = (1/2 \cdot A \cdot C_w^r \cdot \tau^{n-1}) \cdot (h/b^*)^m \cdot \{\exp[(E^* + p \cdot V^*)/(R \cdot T)]\}, \quad (7)$$

где, согласно [15], для горных пород с преобладающим содержанием оливина с повышенным содержанием в нем весовой доли воды (%), условно называемых породами «влажного» оливина, соответствуют следующие физические параметры: $n = 3$, $r = 1,2$, $m = 0$, $\tau = (\tau_{ik}^2)^{1/2}$, $E^* = 480 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$, $V^* = 11 \cdot 10^3 \text{ мм}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$, $A = 10^2 \text{ с}^{-1} \cdot (\text{МПа})^{-n}$, $C_w \geq 10^{-3}$. Следует отметить, что значения констант в (7) у разных авторов, на которых приводятся ссылки в [15], весьма разнятся, и выше приведены усредненные значения. При $C_w = 10^{-3}$ с учетом

$$\tau_{ik}^2 = (4 \cdot \eta^2) \cdot [(\psi_{zz} - \psi_{xx})^2/2 + 2 \cdot \psi_{xz}^2] \quad (8)$$

безразмерная вязкость есть

$$\eta = \{1,27/[(\psi_{zz} - \psi_{xx})^2/2 + 2 \cdot \psi_{xz}^2]^{1/3}\} \cdot \exp\{[10,0 + 5,3 \cdot (1 - z)]/T\}. \quad (9)$$

Отношение сторон модельной области примем равным 1 : 1,723, так что при субдукции по диагонали модельной области угол субдукции составит $\beta = 30^\circ$, а расчетная скорость $V = 10 \text{ мм/год}$ в единицах $\chi \cdot d^{-1}$ равна $V = 0,208 \cdot 10^3$, т.е. в субдуцирующей Амурской литосферной плите ее компоненты $V_x = -0,1914 \cdot 10^3$ и $V_z = -0,1105 \cdot 10^3$.

Поясним, почему при расчете настоящей модели принят угол субдукции $\beta = 30^\circ$, меньший следующего из сейсмических наблюдений угла $\beta = 36^\circ$. По данным [6] движение вещества в мантийном клине, вызываемое взаимным движением Амурской и Охотоморской литосферных плит, происходит не перпендикулярно Центрально-Сахалинскому разлому, а под некоторым углом, и угол, в котором заключено течение материала в мантийном клине, оказывается на 1/6 более острым, чем наблюдаемый по сейсмическим данным, т.е. составит $\beta = 30^\circ$.

Следуя [16], примем фазовые функции $\Gamma^{(l)}$ в виде (напомним, что ось z здесь направлена вверх, поэтому знаки изменены):

$$\Gamma^{(l)} = (1/2) \cdot \{1 - th [z - z^{(l)}(T)]/w^{(l)}\}; z^{(l)}(T) = z_o^{(l)} - \{[\gamma^{(l)} \cdot (T - T_o^{(l)})]/(\rho \cdot g)\}, \quad (10)$$

где $z^{(l)}(T)$ – глубина l -го фазового перехода, $z_0^{(l)}$ и $T_0^{(l)}$ – усредненные глубина и температура фазового перехода, $\gamma^{(410)} = 3 \text{ МПа} \cdot \text{К}^{-1}$ и $\gamma^{(660)} = -3 \text{ МПа} \cdot \text{К}^{-1}$ – наклоны кривых фазового равновесия, $w^{(l)}$ – характерная ширина l -го фазового перехода, $T_0^{(410)} = 1800 \text{ К}$ и $T_0^{(660)} = 1950 \text{ К}$ – средние температуры фазовых переходов. Тепло-ты фазовых переходов, как и в [16], в (2) не учитываются ввиду несущественности в случае развитой конвекции. Из формулы (10) получаем:

$$\Gamma_x^{(l)} = -(\gamma^{(l)}/2 \cdot \rho \cdot g \cdot w^{(l)}) \cdot T_x \cdot ch^{-2} \{[(z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)} \cdot (T - T_0^{(l)}))/(\rho \cdot g)]/w^{(l)}\}, \quad (11)$$

откуда видно, что фазовый переход с $\gamma^{(l)} > 0$ (при $l = 410$) усиливает конвекцию, а фазовый переход с $\gamma^{(l)} < 0$ (при $l = 660$) – ослабляет. В безразмерном виде $z_0^{(410)} = 0,38$, $z_0^{(660)} = 0$, $w^{(l)} = 0,05$, $\gamma^{(410)} = 2,55 \cdot 10^9$, $\gamma^{(660)} = -2,55 \cdot 10^9$, $T_0^{(410)} = 0,92$, $T_0^{(660)} = 0,99$, и тогда на этом основании формулу (11) можно переписать как:

$$\Gamma_x^{(l)} = -(\delta\rho^{(l)} \cdot \gamma^{(l)}/2 \cdot \rho \cdot Ra^{(l)} \cdot w^{(l)}) \cdot T_x \cdot ch^{-2} \{[z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)} \cdot (\delta\rho^{(l)}/\rho \cdot Ra^{(l)}) \cdot (T - T_0^{(l)})]/w^{(l)}\}. \quad (12)$$

В качестве граничных условий приняты изотермичность горизонтальных и вертикальных границ, условия прилипания и непроницаемости границ (кроме «окон» внедрения и выхода субдуцирующей Амурской литосферной плиты, в которых заданы скорости субдукции и проницаемости удаленной от зоны субдукции границы под прямым углом, близким к углу выхода вынужденного мантийного потока при пологой субдукции). Величина Q в (2) отлична от нуля в Амурской и Охотоморской коре мощностью 40 и 7 км соответственно.

Результаты исследования

Предположим, что максимум теплового потока q в [13] расположен над конвективным течением, восходящим от мантийного клина к поверхности Земли на дне Охотского моря, а пространственный размер 2D конвективной ячейки равен характерному поперечному размеру зоны аномального теплового потока, при этом размер конвективной ячейки можно оценить в 300 км.

Чтобы вычислить точную согласованную модель мелкомасштабной конвекции в мантийном клине между настиляющей Охотоморской литосферной плитой и субдуцирующей Амурской, необходимо с вычислительной точки зрения сначала указать в формулах (1), (2) исчезающие безразмерные числа $Ra \rightarrow 0$, $Di = 0$, т.е. игнорировать конвекцию и вязкую диссипацию. Этот подход применяется, поскольку конвекция с Ra и Di (4) проходит через очень интенсивные стадии, а временные шаги при интегрировании (1), (2) становятся слишком малыми, что затрудняет моделирование тепловой структуры литосферных плит. Решая (1) и (2) методом конечных элементов по пространственной сетке $104 \cdot 104$ и по времени методом Рунге–Кутты 3-го порядка, при $Ra \rightarrow 0$, $Di = 0$ и $V = 10 \text{ мм/год}$ получаем безразмерные квазистационарные величины ψ и $T = T_R$, показанные на рис. 2, 3, где линии тока изображены на рис. 2 с интервалом 5 и изотермами на рис. 3 с интервалом 0,05.

Субдуцирующая Амурская литосферная плита считалась жесткой, в то время как вязкость в зоне ее трения (при температурах ниже 1200 К) была снижена на два порядка по сравнению с (5). Последнее снижение вязкости в зоне контакта литосферных плит объясняется смазкой, вызванной отложениями, частично

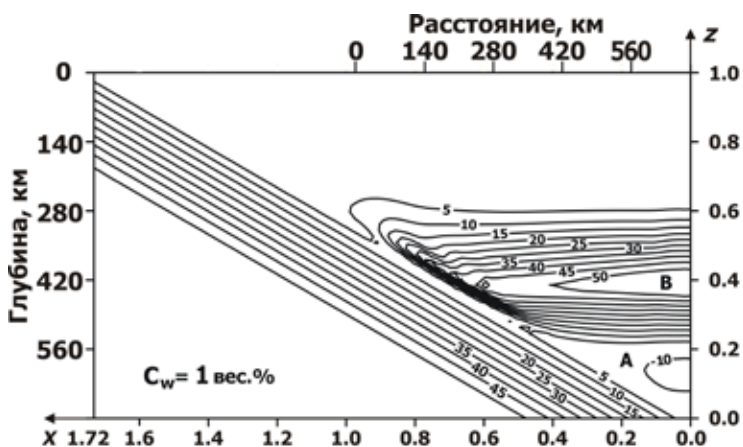


Рис. 2. Глубинный разрез квазистационарного распределения безразмерной функции тока в зоне субдукции Амурской литосферной плиты под Охотоморскую для неньютоновской реологии без учета эффектов диссипативного нагрева и конвекции. Линии тока изображены с интервалом 5. Расстояние вдоль верхней границы отсчитывается от «края» мантийного клина, ограниченного углом 30° . Параллельные равноудаленные линии тока представляют жесткую субдуцирующую Амурскую плиту, линии тока выше соответствуют потокам мантийного клина: первичному *A*, вызванному субдукцией, и вторичному *B*, вызванному потоком *A*. Индуцированный поток *B* движется противоположно погружающейся Амурской литосферной плите

захваченными субдуцирующей Амурской литосферной плитой. Такая смазка предотвращает приклеивание настилающей Охотоморской литосферной плиты к субдуцирующей Амурской [11]. Стоит отметить изотерму $T = 0,15$ на рис. 3, приблизительно соответствующую поверхности Земли, которая понижается в зоне субдукции на ~ 7 км, что является типичной глубиной впадины.

На рис. 2 и 3 показаны результаты вычислений по формулам (7)–(9) для случая неньютоновской реологии (для содержания воды C_w , увеличенного с 10^{-3} до 1 вес.%), поскольку в случае ньютоновской реологии конвекция в мантийном клине не возбуждается.

Расстояние вдоль верхней горизонтальной оси на рис. 2 и 3 отсчитывается от «края» мантийного клина. На рис. 2 показан возвратный поток в мантийном клине, который должен быть наведен в виде двух вихрей *A* и *B*, расположенных один над другим, из которых верхний *B* ($\psi > 0$) вращается по часовой стрелке, а нижний *A* ($\psi < 0$) – против часовой стрелки. Зона «трения» индуцированного течения *B* в погружающейся Амурской литосферной плите характеризуется большой скоростью деформации, поэтому вязкость (7) падает там на несколько порядков и становится возможным инициирование восходящего потока вихря Карига. Встречный поток *B* на рис. 2, очевидно, вызван потоком *A*, индуцируемым погружающейся Амурской литосферной плитой.

Полагая в соответствии с формулой (4), что число Рейнольдса (Ra) равно $6,62 \cdot 10^8$, а число (Di) равно 0,175 (т.е. с учетом эффектов диссипации и конвекции), и принимая во внимание эффекты фазовых переходов, по формулам (1) и (2) установлено, что конвекция возникает в случае неньютоновской реологии (при $C_w = 1$ вес.%) в виде двух вихрей (одна конвективная ячейка, показанная на рис. 4,

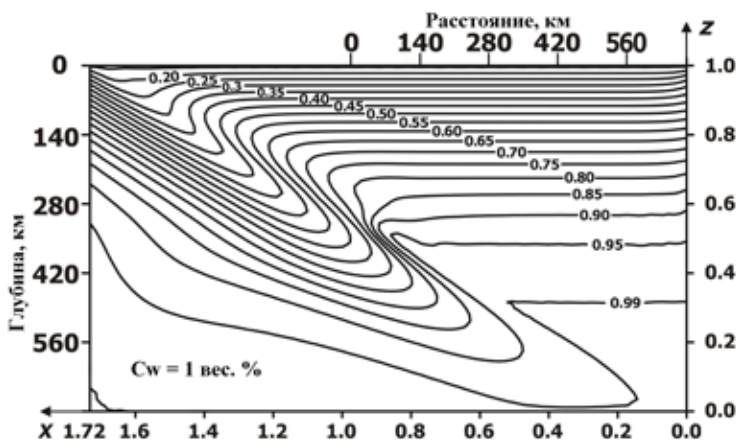


Рис. 3. Глубинный разрез квазистационарного безразмерного распределения температуры в зоне кайнозойской субдукции Амурской литосферной плиты под Охотоморскую без учета эффектов диссипативного нагрева и конвекции для неньютоновской реологии. Изотермы изображены с шагом 0,05. Расстояние вдоль верхней границы отсчитывается от мантийного «края» мантийного клина, ограниченного углом 30°

и другая ячейка, изображенная на рис. 2). Причем начальные потоки (рис. 2) над субдуцирующей Амурской литосферной плитой могут быть разрушены в течение безразмерного времени $0,15 \cdot 10^{-7}$ (в размерной форме 10^4 года). По достижении стадии развитой конвекции (рис. 4) вихревые линии тока с интервалом $2 \cdot 10^6$ действительно соответствуют одной конвективной ячейке, возбуждаемой при скорости субдукции $V = 10$ мм/год.

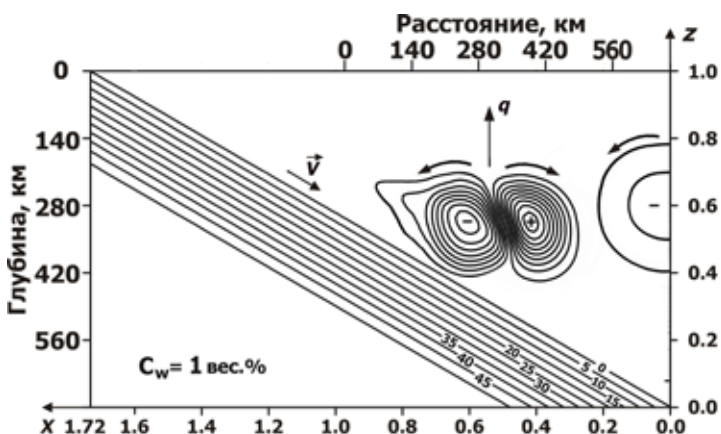


Рис. 4. Глубинный разрез с распределением безразмерной возмущенной функции тока в зоне субдукции Амурской литосферной плиты под Охотоморскую с учетом эффектов диссипативного нагрева и конвекции для неньютоновской реологии и содержания воды $C_w = 1$ вес.% в мантийном клине. Линии тока в конвективных вихрях изображены с шагом $2 \cdot 10^6$. Параллельные равноудаленные линии тока представляют собой жесткую субдуцирующую Амурскую литосферную плиту. Вектор указывает направление возможного переноса тепла и мантийных углеводородов из мантийного клина на дно Охотского моря. Знаки «+» и «-» обозначают положительную и отрицательную функции тока

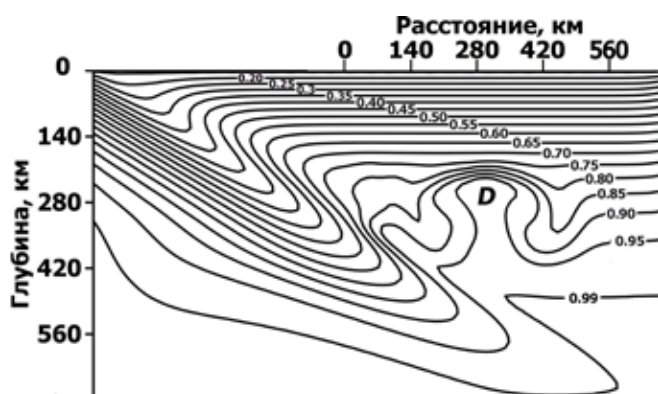


Рис. 5. Глубинный разрез с распределением безразмерной температуры в начальной стадии формирования теплового диапира D , принимающего характерную форму гриба над поверхностью субдуцирующей Амурской литосферной плиты и поднимающегося к основанию вышележащей Охотоморской литосферной плиты из-за эффектов вязкой диссипации и конвекции

Линии вихревого потока, изображенные с интервалом $2 \cdot 10^6$, на самом деле соответствуют размеру конвективной ячейки ~ 300 км, в то время как плотность линий потока соответствует скорости конвекции более ~ 10 м/год. Размер конвекционной ячейки ~ 300 км близок к пространственному горизонтальному масштабу аномалии теплового потока, наблюдаемой в Охотском море к востоку от о-ва Сахалин [13]. На рис. 5 показана начальная ста-

дия формирования теплового диапира D , поднимающегося к поверхности Земли.

В конечной стадии поднимающиеся микровихри и изотермы см. на рис. 6, изображающем практически изотермические (имеющие температуру $T_c = 0,525$ в безразмерном виде или $T_c \sim 1000$ К в размерном) конвективные микровихри, в которых линии тока изображены с интервалом 4. При этом микровихри вращаются со скоростью V_c порядка десятков миллиметров в год.

Таким образом, максимальный конвективный тепловой поток составляет $q_c \sim \rho_m \cdot c_p \cdot T_c \cdot V_c \sim 10^3$ мВт/м² и перераспределяется по ширине конвективной ячейки, формируя увеличение плотности изотерм, что соответствует аномалии поверхностного теплового потока ~ 130 мВт/м². Этот тепловой поток хорошо соответствует значению, наблюдаемому в квази-2D зоне аномалии теплового потока к востоку от о-ва Сахалин [17]. Следует подчеркнуть, что конвективные микровихри, поднимающиеся к основанию Охотской плиты и проникающие в нее, показанные на рис. 6, соответствуют нестационарной стадии конвективной неустойчивости, поскольку на верхней поверхности субдуцирующей Амурской литосферной плиты формируются тепловые диапиры (см. рис. 5 и 6), поднимающиеся на поверхность Земли в течение $\sim 10^6$ лет. В дальнейшем процесс формирования и подъема тепловых диапиров повторяется квазипериодически. Довольно быстрое восхождение термального слоя в неньютоновской верхней мантии со скоростью подъема ~ 1 мм/год обусловлено локальным уменьшением вязкости вокруг микровихрей из-за локальной концентрации вязких напряжений. Стоит отметить, что для случая ньютоновской реологии конвекция, вызванная диссипацией мантийного клина, в виде поперечных валов, как на рис. 4, характерна для очень малых углов субдукции. Конвекция этого типа уже отсутствует, если угол субдукции $\beta = 30^\circ$ и $V = 100$ мм/год [9]. Для $\beta = 30^\circ$ конвективные поперечные крены появляются при $V > 200$ мм/год в случае ньютоновской реологии. В случае неньютоновской реологии конвективные поперечные вихри Карига, управляемые диссипацией, могут возникать при довольно крутой субдукции и ее низкой скорости. Стрелка над границами противоположно вращающихся конвективных вихрей, показанная на рис. 4 для

случая неньютоновской реологии, указывает возможное направление переноса неорганических мантийных углеводородов на поверхность Земли. Таким образом, построенная здесь модель благоприятствует неньютоновской реологии мантийного клина, поскольку она лучше соответствует наблюдаемой локализации аномалий теплового потока, горизонтальному размеру и абсолютному значению теплового потока. Следует отметить, что многочисленные термомеханические модели мантии в зонах субдукции (см., например, [10, 11] и огромное количество ссылок там) показали, что конвекция в виде поперечных валов никогда не происходила, поскольку модели с чрезвычайно малым углом субдукции и достаточно большой ее скоростью ранее никем не исследовались. Для случая неньютоновской реологии двумерная (2D) конвекция, вызванная диссипацией, возникает при скорости $V = 10$ мм/год и среднем содержании воды ≈ 1 вес.% и обусловлена двумя невозмущенными индуцированными потоками (A и B на рис. 2), расположенными друг над другом. Также двумерная (2D) конвекция возникает при значительной вязкой диссипации в зоне трения верхнего потока B с противоположно движущейся субдукционной Амурской литосферной плитой. Следует подчеркнуть, что 2-слойная структура потока, индуцируемого в мантийном клине субдуцирующей Амурской литосферной плитой, появляется только в случае неньютоновской реологии мантии, и именно тогда образуется локализованная зона трения, где субдуцирующая литосферная плита контактирует с противоположно движущимся потоком B . При этом диссипативное тепловыделение становится достаточным для возникновения восходящего конвективного потока, показанного вектором на рис. 4. В мантийном клине преобладает неньютоновская реология, вероятно, из-за большого содержания воды, поступающей туда из субдуцирующей Амурской литосферной плиты. Эффективная вязкость мантии падает с увеличением содержания воды исключительно при неньютоновской реологии мантии. Дополнительно был выполнен расчет для случая океанического типа Охотоморской литосферной плиты возрастом 10^8 лет, и тогда 2D-конвекция в мантийном клине принимает форму, показанную на рис. 7, с гораздо более широкой горизонтальной конвективной ячейкой по сравнению с указанной на рис. 4 для континентального типа Охотоморской литосферной плиты.

Зона аномального теплового потока также становится намного шире, чем это наблюдается на самом деле согласно [13]. Таким образом, эти дополнительные вычисления подтверждают концепцию о континентальном типе Охотоморской плиты в соответствии с [18]. В этой работе [18] показано, что профили глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), выполненные с помощью очень детальной системы



Рис. 6. Глубинный разрез с распределением безразмерной температуры (изотермы изображены с интервалом 0,05) и функцией тока (вихревые линии тока, показаны с интервалом 4) на стадии максимального проникновения теплового диапира в литосферную плиту Охотского моря. Диапир почти изотермичен (с температурой ~ 1000 К). Максимальный конвективный тепловой поток $\sim 10^3$ мВт \cdot м² над центром конвективной ячейки перераспределяется по ширине конвективной ячейки и обеспечивает поверхностный тепловой поток ~ 130 мВт \cdot м² со дна Охотского моря на расстоянии ~ 280 км к востоку от о-ва Сахалин

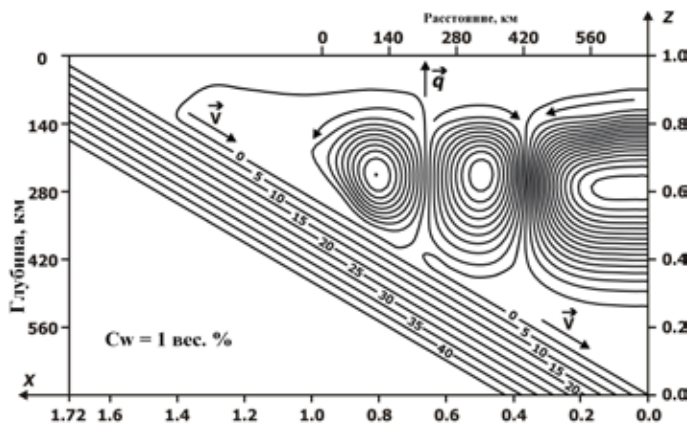


Рис. 7. Безразмерное распределение возмущенной функции тока в зоне субдукции Амурской литосферной плиты под Охотоморскую с учетом эффектов диссипативного нагрева и конвекции для ньютоновской реологии. При содержании воды в горных породах мантийного клина с океаническим типом литосферы под акваторией Охотского моря больше, чем на рис. 4, размер конвекционной ячейки намного превышает горизонтальный масштаб наблюдаемой зоны аномалий теплового потока к востоку от о-ва Сахалин

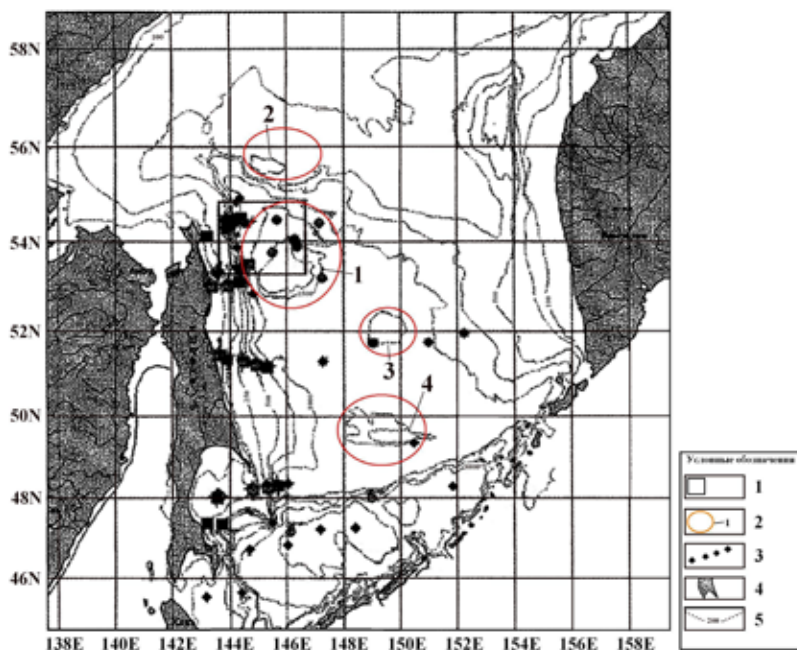


Рис. 8. Расположение перспективных зон для поисков газовых гидратов и пузырьковых потоков метана, поступающих из осадочных пород морского дна на территории Охотского моря [21]. Условные обозначения: 1 – квадратом обозначен район исследований в Охотском море, где в океанической коре был обнаружен толстый слой газогидратов; 2 – основная (1) и дополнительные (2–4) квазиколецевые зоны расположения мантийных диапиров, возникших в зоне субдукции Амурской литосферной плиты под Охотоморскую литосферную плиту; 3 – расположение участков отбора морских осадочных пород; 4 – территория о-ва Сахалин, Китайской Народной Республики, п-ова Камчатка, Курильских островов; 5 – изолинии рельефа дна Охотского моря

наблюдений в конечном итоге позволяют определить земную кору под акваторией Охотского моря как типично континентальную с толстым гранитно-гнейсовым слоем. Модели скоростей верхней мантии вместе с профилями ГСЗ также оказываются похожими на континентальные.

Из представленных глубинных разрезов температуры (рис. 4 и 5) и данных о давлении [19] в мантии Охотоморской литосферной плиты видно, что в условиях мантийной серпентинизации расположенные на глубинах 40–90 км (при $T > 700\text{--}900\text{ K}$ и $P > 13\text{--}16$ кбар) в мантии этого региона пластичные серпентинитовые породы в результате процессов адиабатического всплывания разогретого глубинного вещества к поверхностным слоям коры и их декомпрессии образуют термические диапиры, с которыми связано поступление углеводородных флюидов [20]. То есть можно сказать, что слои серпентинитовых пород аккумулировали поступающие из мантии геофлюиды, создавая природные ловушки углеводородов. Большое количество очагов землетрясений, происходящих в предостроводужных зонах, приводит к нарушению целостности слоев серпентинитовых пород, в которых аккумулированы значительные запасы углеводородов. Это вызывает поступление углеводородов в приповерхностные слои осадочных пород по тектоническим разломам и даже газогидратов из морских отложений над зонами подъема термических диапиров в зонах субдукции мантии. Такой перспективный район для поисков месторождений углеводородов расположен в Охотском море, около северо-восточной окраины о-ва Сахалин (рис. 8). Речь идет об участке дна (рис. 8, 1), где обнаружены 11 газогидратосодержащих площадей с очень большой толщиной слоя газогидратов (34 см), а также более 200 потоков пузырей метана (CH_4) из донных осадков. Наличие найденных площадей газогидратов над почти кольцевой зоной (по контуру изолинии глубины дна 1500 м) в месте подъема северосахалинских термических диапиров (54°N , 146°E) подтверждает изложенные в этой статье данные о перспективности поисков новых месторождений нефти в зонах Амурско-Охотоморской кайнозойской субдукции в районах, где расположены термические диапиры (зоны 2–4 на рис. 8).

Заключение

В случае неньютоновской реологии мантии характерный пространственный размер конвективной ячейки в мантийном клине, образовавшемся в результате кайнозойской субдукции Амурской литосферной плиты под Охотоморскую, составляет ~300 км при скорости субдукции 10 мм в год. Пространственный размер этой конвекционной ячейки примерно совпадает с характерным пространственным размером 2D-зоны аномального теплового потока, наблюдаемого на дне Охотского моря к востоку от о-ва Сахалин. Тепловой диапир, поднимающийся с поверхности субдуцирующей Амурской литосферной плиты, содержит конвективные микровихри и достигает глубины ~40–90 км и может обеспечить аномальный тепловой поток $\sim 130\text{ мВт} \cdot \text{м}^2$, фактически наблюдаемый к востоку от о-ва Сахалин [17]. Представленная здесь термомеханическая модель мантийного клина для угла $\beta = 36^\circ$ и скорости субдукции $V \approx 10$ мм в год хорошо согласуется с результатами самых последних GPS-наблюдений, а также с наблюдаемым аномальным тепловым потоком и местоположением и горизонтальной протяженностью зоны аномалии теплового потока к востоку от о-ва Сахалин. Таким

образом, это является убедительным аргументом в пользу кайнозойской субдукции Амурской литосферной плиты на восток и подтверждает континентальный тип Охотоморской литосферной плиты. Модель предсказывает, что нефтегазоносная зона будет расположена к востоку от о-ва Сахалин в зоне аномального теплового потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // *Tectonophysics*. 1981. Vol. 76. P. 1–45.
2. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island // *Geodyn. Tectonophysics*. 2017. Vol. 8, N 1. P. 181–202. DOI: 105800/GT-2017-8-1-0237.
3. Ismail-Zadeh A., Honda S., Tsepelev I. Linking mantle upwelling with the lithosphere decent in the Japan Sea evolution: a hypothesis // *Sci. Rep.* 2013. Vol. 3. 1137.
4. Sunuwar L., Cuadra C., Karkee M.B. Strong ground motion attenuation in the Sea of Japan (Okhotsk-Amur plates boundary) region // 13th World Conf. on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, August 1–6, 2004. Paper N 197.
5. Taira A. Tectonic evolution of the Japanese island arc system // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2001. Vol. 29. P. 109–134. DOI: 10.1146/ANNUREV.EARTH.29.1.109.
6. Kogan M.G., Steblou G.M. Current global plate kinematics from GPS (1995–2007) with the plate-consistent reference frame // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. B04416. DOI: 10.1029/2007JB005353.
7. Katsumata K., Kasahara M., Ichiyanagi M., Kikuchi M., Sen R.-S., Kim Ch.-U., Ivaschenko A., Tatevossian R. The 27 May 1995 M_s 7.6 Northern Sakhalin Earthquake: An Earthquake on an Uncertain Plate Boundary // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2004. Vol. 94, N 1. P. 117–130.
8. Seno T., Sakurai T., Stein S. Can the Okhotsk plate be discriminated From the North American plate? // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1996. Vol. 101, iss. B5. P. 11305–11315.
9. Гаврилов С.В. Исследование механизма формирования островных дуг и тылового раздвигания литосферы // *Геофиз. исслед.* 2014. Т. 15, № 4. С. 35–43.
10. Gerya T.V., Connolly J.A.D., Yuen D.A., Gorczyk W., Capel A.M. Seismic implications of mantle wedge plumes // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2006. Vol. 156. P. 59–74.
11. Gerya T. Future directions in subduction modeling // *J. Geodyn.* 2011. V. 52. P. 344–378.
12. Karig D.E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific // *J. Geophys. Res.* 1971. Vol. 76, N 11. P. 2542–2561.
13. Zharkov V.N. *Physics of the Earth's Interiors*. Duesseldorf: Lambert Acad. Publ., 2019. 438 p.
14. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. New York: Cambridge Univ. Press, 2001. 940 p.
15. Billen M., Hirth G. Newtonian versus non-Newtonian upper mantle viscosity: implications for subduction initiation // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. L19304. DOI: 10.1029/2005GL023457.
16. Трубицын В.П., Трубицын А.П. Численная модель образования совокупности литосферных плит и их прохождения через границу 660 км // *Физика Земли*. 2014. № 6. С. 138–147.
17. Карта теплового потока территории СССР и прилегающих областей / ред. Смирнов Я.Б. М.: ГУГК, 1980.
18. Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А. Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона // *Региональная геология и металлогения*. 2018. № 76. С. 70–82.
19. Юркова Р.М., Воронин Б.И. Подъем и преобразование мантийных углеводородных флюидов в связи с формированием офиолитового диапира // *Генезис углеводородных флюидов и месторождений*. М.: ГЕОС, 2006. С. 56–67.
20. Маракушев А.А. Серпентинизация гарцбургитов // *Изв. АН СССР. Серия геологическая*. 1975. № 7. С. 5–20.
21. Обжиров А.И. Миграция углеводородов из недр к поверхности и формирование нефтегазовых залежей и газогидратов в Охотском море в период сейсмотектонических активизаций // *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: материалы Всерос. конф.* М.: ГЕОС, 2008. С. 359–362.

REFERENCES

1. Zonenshain L.P., Savostin L.A. Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia. *Tectonophys.* 1981;76:1-45.
2. Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. *Geodyn. Tectonophys.* 2017;8(1):181-202. DOI: 105800/GT-2017-8-1-0237.
3. Ismail-Zadeh A., Honda S., Tsepelev I. Linking mantle upwelling with the lithosphere decent in the Japan Sea evolution: a hypothesis. *Sci. Rep.* 2013;3:1137.
4. Sunuwar L, Cuadra C, Karkee M.B. Strong ground motion attenuation in the Sea of Japan (Okhotsk-Amur plates boundary) region. In: *13th World Conf. on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004. Paper N 197.
5. Taira A. Tectonic evolution of the Japanese island arc system. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2001;29:109-134. DOI: 10.1146/ANNUREV.EARTH.29.1.109.
6. Kogan M.G., Steblov G.M. Current global plate kinematics from GPS (1995–2007) with the plate-consistent reference frame. *J. Geophys. Res.* 2008;113:B04416. DOI: 10.1029/2007JB005353.
7. Katsumata K., Kasahara M., Ichiyonagi M., Kikuchi M., Sen R.-S., Kim Ch.-U., Ivaschenko A., Taveosian R. The 27 May 1995 M_s 7.6 Northern Sakhalin Earthquake: An earthquake on an uncertain plate boundary. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2004;94(1):117-130.
8. Seno T., Sakurai T., Stein S. Can the Okhotsk plate be discriminated From the North American plate? *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1996;101(B5):11305-11315.
9. Gavrilov S.V. Issledovanie mehanizma formirovaniya ostrovnykh dug i tylovogo razdviganiya litosfery = [Investigation of the island arc formation mechanism and the back-arc lithosphere spreading]. *Geofizicheskie Issledovaniya.* 2014;15(4):35-43. (In Russ.).
10. Gerya T.V., Connolly J.A.D., Yuen D.A., Gorczyk W., Capel A.M. Seismic implications of mantle wedge plumes. *Phys. Earth Planet. Inter.* 2006;156:59-74.
11. Gerya T. Future directions in subduction modeling. *J. Geodyn.* 2011;52:344-378.
12. Karig D.E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific. *J. Geophys. Res.* 1971;76(11):2542-2561.
13. Zharkov V.N. Physics of the Earth's Interiors. Duesseldorf: Lambert Acad. Publ.; 2019. 438 p.
14. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. New York: Cambridge Univ. Press; 2001. 940 p.
15. Billen M., Hirth G. Newtonian versus non-Newtonian Upper Mantle Viscosity: Implications for Subduction Initiation. *Geophys. Res. Lett.* 2005;32:L19304. DOI: 10.1029/2005GL023458.
16. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P. Chislennaya model' obrazovaniya sovokupnosti litosfernykh plit i ikh prokhozhdeniya cherez granitsu 660 km = [Numerical model of formation of the set of lithospheric plates and their penetration through the 660 km boundary]. *Fizika Zemli.* 2014;(6):138-147. (In Russ.).
17. Smirnov Y.B. (ed.). Karta teplovogo potoka territorii SSSR i prilegayushikh oblastey = [Map of the heat flow of the territory of the USSR and adjacent areas]. Moscow: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii; 1980. (In Russ.).
18. Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Gontovaya L.I., Pavlenkova G.A. Glubinnoe stroenie i geodinamika Okhotomorskogo regiona = [Deep structure and geodynamics of the Sea of Okhotsk region]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya.* 2018;(76):70-82. (In Russ.).
19. Yurkova R.M., Voronin B.I. Pod'em i preobrazovanie mantiynykh uglevodorodnykh flyuidov v svyazi s formirovaniem ofiolitovogo diapira = [Ascent and transformation of mantle hydrocarbon fluids in connection with a formation of ophiolite diapirs]. In: *The genesis of hydrocarbon fluids and deposits*. Moscow: GEOS; 2006. P. 56-67. (In Russ.).
20. Marakushev A.A. Serpentinizatsiya gartsburgitov = [Harzburgite serpentinization]. *Izvestiya AN SSSR. Geol. Ser.* 1975;(7):5-20. (In Russ.).
21. Obzhairov A.I. Migratsiya uglevodorodov iz nedr k poverkhnosti i formirovanie netegazovykh zalezhey i gazogidratov v Okhotskom more v period seysmotektonicheskikh aktivizatsiy = [Migration of hydrocarbons from the subsurface to the surface and formation of oil and gas deposits and gas hydrates in the Sea of Okhotsk during the period of seismotectonic activations]. In: *Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, nefi', gaz i ikh paragenезy* = [Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses]; materials of the All-Russ. Conf. Moscow: GEOS; 2008. P. 359-362. (In Russ.).